

# 蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法

王敏晓<sup>1</sup>, 李潇<sup>2</sup>, 韩小齐<sup>2</sup>, 王维洲<sup>3</sup>, 刘文颖<sup>2</sup>

- (1. 埃尔朗根-纽伦堡大学技术系, 德国 埃尔朗根市 91052;
2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
3. 国网甘肃省电力公司, 甘肃省 兰州市 730030)

## A Master-slave Game Trading Decision Method for the Participation of Electric Thermal Storage Boiler Load in Hampered Wind Power Consumption

WANG Minxiao<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>2</sup>, HAN Xiaoqi<sup>2</sup>, WANG Weizhou<sup>3</sup>, LIU Wenying<sup>2</sup>

- (1. Faculty of Engineering, Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg, Erlangen 91052, Germany;
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;
3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, Gansu Province, China)

**Abstract:** As the proportion of renewable energy integrated into the grid continues to increase, the problem of hampered wind power consumption caused by insufficient peak shaving capability of conventional power generation in the sending-end power grid is highlighted, therefore it is imperative to explore the adjustable potential of the load to improve the capacity for wind power consumption. The load of the electric thermal storage boiler is adjustable, thus, incentivizing electric thermal storage boiler companies to participate in load adjustment through reasonable market trading methods has become a new way to consume hampered wind power. To facilitate the above, this paper proposes a master-slave game trading decision method for the participation of electric thermal storage boiler load in hampered wind power consumption. First, the principle of the effect of electric thermal storage boiler load participation on the hampered wind power consumption is analyzed; secondly, the load-generation bilateral benefits and the master-slave game relationship are investigated; based on this, a master-slave game trading decision method for the participation of electric thermal

storage boiler load in hampered wind power consumption is proposed; finally, the actual operating data of the load and generation of a renewable energy sending-end grid is used for simulation analysis, it is verified that the proposed decision method can sufficiently motivate the electric thermal storage boiler companies to participate in the consumption of wind power, to effectively improve the wind power consumption capacity.

**Keywords:** hampered wind power; electric thermal storage boiler; master-slave game; trading decision

**摘要:** 随着新能源接入电网比例的不不断提高, 新能源送端电网常规电源调峰能力不足造成的风电消纳受阻问题凸显, 急需挖掘负荷的可调节潜力以增加对风电的消纳能力。蓄热电锅炉负荷具有可调节特性, 通过合理的市场交易方法激励蓄热电锅炉企业参与调节成为消纳受阻风电的新途径。为此, 提出了一种蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法。首先分析了蓄热电锅炉负荷参与调控对消纳受阻风电的作用机理; 其次对蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的荷源双边收益以及主从博弈关系进行了研究; 基于此, 提出了蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法; 最后, 采用某新能源送端电网荷源实际运行数据进行仿真分析, 验证了所提决策方法可充分调动蓄热电锅炉企业参与消纳风电的积极性, 从而有效提升风电消纳能力。

**关键词:** 受阻风电; 蓄热电锅炉; 主从博弈; 交易决策

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0208400); 国家电网有限公司总部科技项目(面向跨境互联的多能互补新型能源系统关键技术研究)。

National Key Research and Development Program of China (2018YFE0208400); Science and Technology Project of SGCC(Research of Key Technologies of Cross-border Interconnected Novel Energy System with Multi-energy Complementation).

## 0 引言

中国“三北”地区大部分火电厂为热电厂,在冬季供暖期供热机组多以“以热定电”模式运行。随着风电接入电网比例的不断提高,系统调峰能力严重不足<sup>[1-2]</sup>,在负荷低谷时段为了保证电网的有功平衡,提高新能源利用率,急需挖掘负荷的可调节潜力以增加对风电的消纳能力。

蓄热电锅炉负荷具有容量大和可调节特性,参与调控可以缓解系统调峰能力不足带来的风电消纳问题<sup>[3-4]</sup>。为此,业界在技术和市场交易方面对蓄热电锅炉参与调节进行了一定研究。文献[5]构建了一种蓄热电锅炉调度方案,以系统运营成本最小和系统污染排放量最小为目标建立多目标优化调度模型,并仿真验证其有效性;文献[6]提出了一种储能融合蓄热式电锅炉的优化调度方法,能够兼顾蓄热电锅炉调节电极的使用寿命,有效地解决了蓄热式电锅炉功率调节能力与风电出力变化不匹配的问题;文献[7-10]从多角度分析了电锅炉设备建模问题及电-热联合调度问题;文献[11-14]考虑园区供热约束、荷源不确定性、多能耦合等多方因素,提出多种蓄热式电采暖优化配置方法;文献[15-16]对限定热负荷供热需求的末端热负荷需求预测方法进行了相关研究。由于风电场和蓄热电锅炉企业分属不同的利益主体,在技术上可行的方案还需要各利益主体获得经济收益方具有实施的可行性。

文献[17]对采用蓄热电锅炉提高风电消纳水平的经济性进行了评估,结果表明,利用电力交易激励方法可充分调动蓄热电锅炉企业参与消纳风电的积极性;文献[18]提出了基于风电场上报未消纳电量、储热企业上报需求函数的日前市场集中交易,统一出清调峰电价的方式,该方式具有理论上的可行性,但对于集中交易平台仍不完善的情况难以实施;文献[19]提出大用户直购电交易模式增加电网调峰容量;文献[20]基于蓄热电锅炉企业与风电场之间双边交易,引入收益分配参数对风电上网电价进行了区间优化;文献[21]基于蓄热电锅炉等热负荷可调节特性,设计了适应热负荷参与风电消纳的“三北”地区日前市场交易机制;文献[22]以社区群电热交易为目标,提出了考虑低碳优先的社区群电热交易方法;文献[23-25]提出蓄热电锅炉类的电转热设备参与电力市场交易出清方法;文献[26-30]基于不完全信息博弈、双层博弈等多种博弈理论,设计多种蓄热电锅炉等热负荷参与荷源双边交易方法。

综上,在蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电方面,目前研究多从电网调峰整体利益出发对蓄热电锅炉企业参与风电消纳方法进行研究,而蓄热电锅炉和风电场均为独立利益主体,实际市场交易中,蓄热电锅炉企业对于降低购电成本的诉求非常强烈,而风电企业在出现风电受阻时享有优先报价权,在交易过程中往往起主导作用,是一种主从博弈的市场交易方式,但已有文献并没有以此为切入点提出相应的决策方法。

针对上述问题,本文提出一种蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法。首先从技术的角度对蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的可行性进行分析;然后研究交易过程中风电和蓄热电锅炉企业的双边收益及主从博弈关系;最后提出蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法,并采用某新能源送端电网实际荷源运行数据仿真验证该决策方法的可行性和有效性。

## 1 蓄热电锅炉负荷参与调节对消纳受阻风电的作用机理

### 1.1 系统“下调峰”能力不足造成风电受阻

风电是目前新能源的主力电源之一,其出力具有随机波动及反调峰特性,大规模接入电网后导致系统等效负荷(系统实际负荷与风电代数和)峰谷差显著增加,调峰需求随着风电发电容量的增加而增大。由于常规电源的比例随风电接入比例的升高而缩减,在冬季供暖期常规电源中占比较大的热电厂受到“以热定电”运行模式的限制,系统“下调峰”能力严重不足,当常规电源的最小出力达到下调极限值,若仍未满足系统调峰需求,则出现风电功率送出受阻。

由图1可以看出,系统等效负荷峰谷差 $d_2$ 大于系统实际负荷 $d_1$ ,增大了系统调峰需求。当常规电源的最小出力达到下调极限值时,部分风电无法被系统消纳,如图1中阴影部分。

### 1.2 蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的作用机理

近年来蓄热电锅炉供暖负荷发展迅速,冬季供暖期最大单企用电规模可达200 MW以上,其具有储能及可调节双重特性,参与调控可有效缓解系统的调峰压力。图2为蓄热电锅炉负荷参与调节前后的用电功率及等效负荷曲线。可以看出,蓄热电锅炉可以在风电大发时利用风电蓄热,增加风电受阻时段 $T_0$ 的用电负荷,有效提升等效负荷曲线的“低谷点”,进而缩

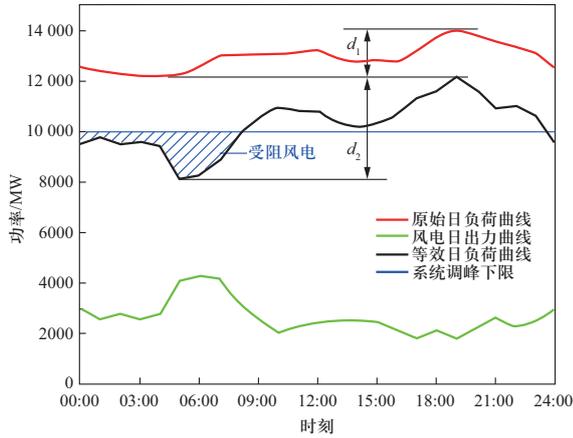


图1 系统向下调峰的能力不足引起风电受阻

Fig. 1 Insufficient ability of the system to regulate the peak downward causes hampered wind power

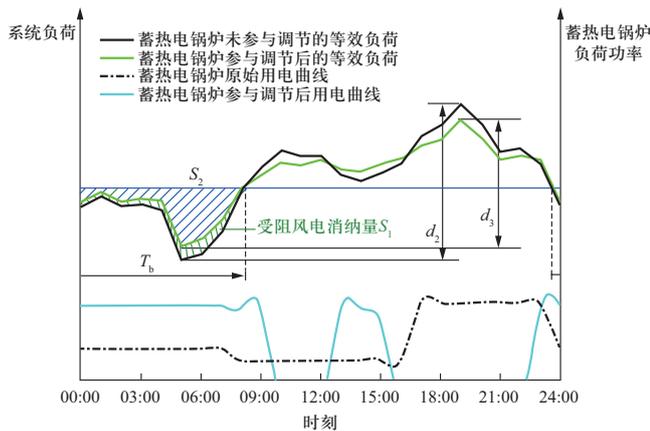


图2 蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的作用机理

Fig. 2 Principle of the effect of electric thermal storage boiler load participation on the hampered wind power consumption

小等效负荷曲线的峰谷差（由 $d_2$ 变为 $d_3$ ），缓解了系统的调峰压力，同时增加受阻风电消纳量（图中 $S_1$ 所示面积）。

## 2 荷源协调控制的双边收益以及市场交易关系

### 2.1 蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的荷源双边收益分析

由1.1节分析可知，出现受阻风电的根本原因是新能源装机规模扩大后系统“下调峰”能力不足，1.2节论述了蓄热电锅炉负荷可以利用低谷风电进行蓄热，从而消纳受阻风电。为了充分激励蓄热电锅炉企业发挥可调节能力多消纳风电，本文提出蓄热电锅炉企业与风电场企业采用主从博弈交易决策方法，双方协定消纳受阻风电的电价和消纳电量，从而保障风电的增

发以及荷源双边共赢。

#### 2.1.1 风电场增发电量所获得的收益分析

在协商交易过程中，风电场的收益可以表示为

$$I_1 = (R_{W_0} - C_{W_0})W_0 + \sum_{T=1}^{T_b} (R_B^T - C_{W_0})\Delta W_B^T \quad (1)$$

式中： $R_{W_0}$ 和 $W_0$ 分别表示风电未受阻时段内风电场的计划上网电价和电量； $C_{W_0}$ 表示风电场的单位成本电价； $R_B^T$ 和 $\Delta W_B^T$ 分别表示风电受阻时段 $T$ 内交易双方协定的风电电价、消纳电量； $T_b$ 表示末尾受阻风电时段。

由式(1)可知，受阻风电消纳电量越多，风电场的预期收益越大。

#### 2.1.2 蓄热电锅炉企业的收益分析

在协商交易过程中，蓄热电锅炉企业的收益可以表示为

$$I_2 = R_L V_L - R_{LE} \left( W_{L_0} - \sum_{T=1}^{T_b} \Delta W_B^T \right) - \sum_{T=1}^{T_b} R_{LB}^T \Delta W_B^T \quad (2)$$

式中： $R_L$ 表示单位热量售价； $V_L$ 表示额定供热量； $W_{L_0}$ 表示蓄热电锅炉企业的总供热需求电量，可根据单位面积预测热负荷、供热面积、供热时长、电热转换效率等参数得出（为突出重点，蓄热电锅炉企业的运营成本在此只考虑用电成本）； $R_{LE}$ 表示蓄热电锅炉企业参与双边交易前的用电电价； $R_{LB}^T$ 表示风电受阻时段 $T$ 蓄热电锅炉企业的用电单价，由时段 $T$ 的受阻风电上网电价 $R_B^T$ 和固定过网费 $R_{BN}$ 两部分构成（ $R_{LB}^T = R_B^T + R_{BN}$ ）； $\Delta W_B^T$ 的含义同式(1)。

由式(2)可知，风电受阻时段蓄热电锅炉企业用电电价越低，预期收益越大。

## 2.2 蓄热电锅炉企业和风电场的市场交易关系

根据式(1)、(2)可知，在双边交易的过程中，蓄热电锅炉、风电场企业的消纳受阻风电收益主要取决于受阻风电电价和消纳的受阻风电电量。在蓄热电锅炉企业和风电场双边协商过程中，两个独立利益主体之间为达到各自收益的最大化，将进行决策博弈。

在消纳行为中，风电场具有降低电价来促进消纳受阻风电的意愿。而蓄热电锅炉企业参与消纳会影响其运营成本，对于风电场发布的电价，如果蓄热电锅炉企业经核算后不能得到最优的收益，就失去参与调节的积极性，从而影响受阻风电的实际消纳量和收益。因此该消纳行为中蓄热电锅炉企业为主导者，风电场为跟随者。图3描绘了双边博弈过程中风电场和蓄热电锅炉企业主从博弈的决策关系。

由图3可以看出，在博弈决策过程中，决策者之

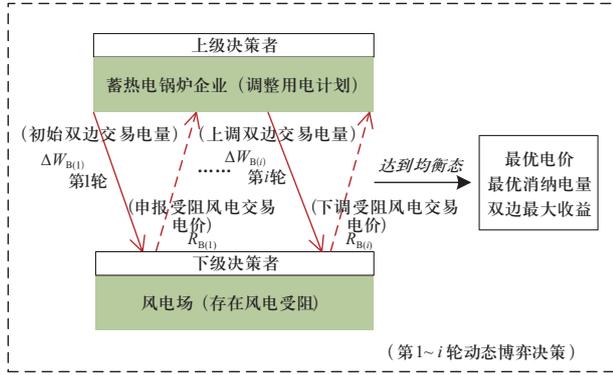


图3 风电场和蓄热电锅炉企业主从博弈的决策关系

Fig. 3 Decision relationship in master-slave game of wind farms and electric thermal storage boiler companies

间存在明显的地位差异: 首先居于主导地位蓄热电锅炉企业具有确定消纳量的主动权先预报消纳量; 处于从属地位的风电场则跟随主导方申报的消纳量申报受阻风电交易电价; 对于风电场申报的交易电价, 如果蓄热电锅炉企业经核算后不能达到收益目标, 则重新调整预报消纳电量, 风电场则跟随调整申报受阻风电交易电价, 并采用低价申报的方式来激励主导方多消纳受阻风电。

因此, 荷源双边企业的收益和策略(消纳量及交易电价)是相互制约的, 根据对方的策略以自身收益最大为原则不断调整对策, 直至达到均衡态。该决策过程可视为满足主从先后顺序, 从而构成以蓄热电锅炉企业为主导的源荷主从博弈。

### 3 荷源协调控制的主从博弈交易决策方法

在非受阻风电时段, 蓄热电锅炉以蓄热优先供热模式运行, 蓄热不足时再向主网购电补充供热。风电受阻时段, 蓄热电锅炉优先以最大储热模式运行, 尽可能地利用低电价的受阻风电, 降低运行成本, 受阻风电交易电价和消纳量通过主从博弈交易决策方法确定。主从博弈交易决策方法的核心包括基于消纳受阻风电的源荷收益模型和主从博弈交易均衡点的求解两部分。

#### 3.1 基于消纳受阻风电的源荷收益模型

##### 3.1.1 基于增发受阻风电的风电场收益模型

对于风电场来说, 在出现风电送出受阻时, 以自身收益增量最大化为目标, 建立增发受阻风电的发电收益模型:

$$\max \Delta I_1 = \sum_{T=1}^{T_b} \Delta I_1^T = \sum_{T=1}^{T_b} (R_B^T - C_{W0}) \Delta W_B^T \quad (3)$$

式中:  $\Delta I_1$  表示风电场的增量收益函数;  $\Delta I_1^T$  表示受阻风电时段  $T$  风电场的增量收益;  $R_B^T$  表示受阻风电时段  $T$  的双边交易电价;  $\Delta W_B^T$  表示受阻风电时段  $T$  的预计消纳量;  $C_{W0}$  和  $T_b$  的含义同式 (1)。

约束条件包括:

1) 双边交易电价上下限约束。

$$C_{W0} \leq R_B^T \leq R_{W0} \quad (4)$$

式中:  $R_{W0}$  表示风电场的计划上网电价。

2) 受阻风电消纳电量约束。

$$0 \leq \Delta W_B^T \leq W_{B0}^T \quad (5)$$

式中:  $W_{B0}^T$  表示时段  $T$  内预测受阻风电量。

##### 3.1.2 基于消纳受阻风电的蓄热电锅炉企业用电收益模型

对于蓄热电锅炉企业来说, 在风电场申报双边交易电价的前提下, 以自身收益增量最大化为目标, 建立用电收益模型:

$$\max \Delta I_2 = \sum_{T=1}^{T_b} \Delta I_2^T = \sum_{T=1}^{T_b} (R_{LE}^T - R_{LB}^T) \Delta W_B^T = \sum_{T=1}^{T_b} (R_{LE}^T - R_{LB}^T - R_{BN}) \Delta W_B^T \quad (6)$$

式中:  $\Delta I_2$  表示蓄热电锅炉企业的增量收益函数;  $\Delta I_2^T$  表示受阻风电时段  $T$  内蓄热电锅炉企业的增量收益;  $R_{LE}^T$ 、 $R_{LB}^T$  的含义同式 (2), 在不计电量损失时,  $R_B^T$  和  $\Delta W_B^T$  的含义同式 (5);  $R_{BN}$  表示固定过网费。

约束条件包括:

1) 受阻风电消纳电量约束。

$$0 \leq \Delta W_B^T \leq \Delta W_{Bmax}^T \quad (7)$$

式中:  $\Delta W_{Bmax}^T = \min\{P_{LN} \Delta T, \Delta W_{L,max}^T\}$  表示该时段内的最大可消纳量,  $P_{LN}$  表示蓄热电锅炉的额定用电功率,  $\Delta T$  表示时段时长,  $\Delta W_{L,max}^T$  表示该时段内达到蓄满状态所需用电量, 满足  $0 \leq \Delta W_{L,max}^T \leq W_{L,max}^T$ , 受最大蓄热用电量  $W_{L,max}^T$  的制约。其他运行约束, 此处不再赘述。

2) 用电电价上下限约束。

$$R_L^{\min} \leq R_{LB}^T \leq R_L^{\max} \quad (8)$$

式中:  $R_L^{\max}$  和  $R_L^{\min}$  分别表示蓄热电锅炉用电电价的上、下限。

#### 3.2 主从博弈交易均衡点的求解

虽然主从双方都希望自己在消纳受阻风电时收益最大, 但在发电和用电必须平衡的约束下, 要找到双

方都获得最大收益的平衡点,就需要双方在电价电量交易过程中进行多次主从博弈,确定每一个交易决策时段 $T$ 内受阻风电电价及消纳电量的最优方案,以达到双边共赢。

各受阻风电时段内博弈均衡点的求解流程如下:

1) 输入参加主从博弈交易的风电场和蓄热电锅炉的基本数据,交易时段初始化 $T=1$ 。

2) 博弈轮次初始化 $k=1$ 。

3) 针对风电受阻时段 $T$ ,蓄热电锅炉企业先申报第 $k$ 轮的意向消纳电量,风电场据此来申报第 $k$ 轮博弈的受阻风电交易电价 $R_{B(k)}^T$ 。

4) 蓄热电锅炉企业基于风电场的报价 $R_{B(k)}^T$ 进行收益核算后再上报受阻风电消纳量 $\Delta W_{B(k)}^T$ (主导者形成收益决策需考虑跟随者收益可实现):蓄热电锅炉企业上报消纳电量可产生的最大风电收益 $\Delta W_{B(k)}^T(R_{W0} - C_{W0})$ 不小于风电场申报决策最大可行收益 $W_{B0}^{\max}(R_{B(k)}^T - C_{W0})$ , $\Delta W_{B(k)}^T$ 满足:

$$\Delta W_{B(k)}^T = \min \left\{ W_{B0}^{\max} \frac{R_{B(k)}^T - C_{W0}}{R_{W0} - C_{W0}}, \Delta W_{B\max}^T \right\} \quad (9)$$

式中: $W_{B0}^{\max}$ 表示最大受阻电量; $R_{W0}$ 表示风电场的计划上网电价; $R_{B(k)}^T$ 表示受阻风电时段 $T$ 内第 $k$ 轮双边交易电价; $C_{W0}$ 表示风电场的单位成本电价; $\Delta W_{B\max}^T$ 的含义同式(7),即受阻风电时段 $T$ 内的最大可消纳量。

5) 将 $R_{B(k)}^T$ 、 $\Delta W_{B(k)}^T$ 的值依次代入式(3)、(6)中,得到该时段风电场的收益 $\Delta I_{1(k)}^T$ 、蓄热电锅炉企业的收益 $\Delta I_{2(k)}^T$ 。

6) 判断是否满足双边收益博弈均衡条件:

$$\begin{cases} \arg \max_{R_{B(k)}^T} I_{1(k)}^T(R_{B(k)}^T, \Delta W_{B(k)}^T) \\ \arg \max_{\Delta W_{B(k)}^T} I_{2(k)}^T(R_{B(k)}^T, \Delta W_{B(k)}^T) \end{cases} \quad (10)$$

根据式(3)和(6),双方收益均是关于电价 $R_{B(k)}^T$ 和消纳量 $\Delta W_{B(k)}^T$ 的函数,双方收益相互制约。对于风电场,根据对方申报的消纳量,调整电价,使自身收益最大化;对于蓄热电锅炉企业,根据对方申报的电价,调整消纳量,使得自身收益最大化。当任意一方不能单方面调整申报策略而增加收益时,达到双方收益均衡。

若不满足,继续步骤7);否则,转步骤8)。

7) 令 $k=k+1$ ,蓄热电锅炉以 $E$ (MWh)为步长调整用电量,重复步骤3)~6),进入下一轮博弈。

8) 确定时段 $T$ 内的博弈均衡点 $(R_{B^*}^T, \Delta W_{B^*}^T)$ 能满足式(10),达到均衡。

9) 令 $T=T+1$ ,重复步骤2)~8),求解下一个交易时段的博弈均衡点。

10) 输出各交易时段内受阻风电电价及消纳量的最优解,即求解所得的最优决策结果。

### 3.3 蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法

综上所述,本文提出蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法,主要包括基于消纳受阻风电的荷源双边收益模型的建立、主从博弈交易均衡点的求解以及均衡态下双边最优收益计算三大部分,如图4所示。具体流程包括:

1) 输入用于交易决策的基本参数,包括风电场的计划上网电价、发电成本电价、蓄热电锅炉系统的需求电量和初始用电电价等。

2) 风电场根据预测发电量和计划消纳电量数据,上报风电受阻情况,包括受阻时段以及受阻电量。

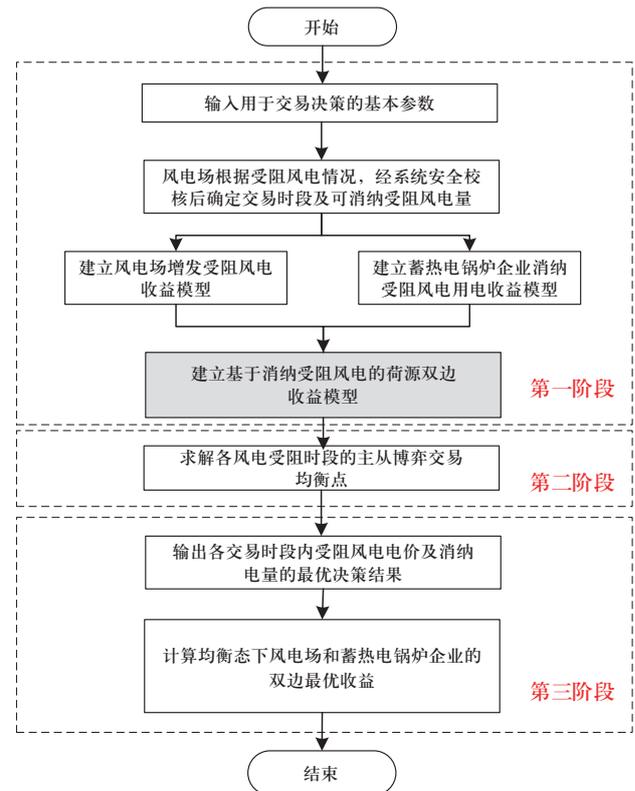


图4 蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的交易决策方法  
Fig. 4 Trading decision method for the participation of electric thermal storage boiler load in the consumption of hampered wind power

3) 基于风电受阻情况确立交易决策时段, 建立风电场增发受阻风电收益模型。

4) 以自身收益增量最大化为目标建立蓄热电锅炉企业消纳受阻风电的收益模型。

5) 建立基于消纳受阻风电的荷源双边主从关系。

6) 求解各风电受阻时段主从博弈后的交易均衡点。

7) 输出各交易时段内受阻风电的双边交易电价及消纳电量的最优决策结果。

8) 计算该决策结果下风电场和蓄热电锅炉企业双边最优收益。

## 4 算例分析

### 4.1 算例简介

本文以某新能源送端电网风电场与蓄热电锅炉典型日实际数据进行仿真计算, 具体参数设置如下。

风电场的平均发电成本为120元/MWh, 计划上网电价为308元/MWh (不考虑补贴电价), 典型日风电受阻情况如表1所示, 可知风电受阻时段为23:00—次日10:00, 总受阻风电量为3425 MWh。为增加受阻风电消纳量, 在上述时段进行荷源主从博弈交易。

表1 风电受阻情况

Table 1 Wind power hampered situation

| 时段         | 预测电量 /MWh | 计划消纳电量 /MWh | 受阻电量 /MWh |
|------------|-----------|-------------|-----------|
| 23:00—0:00 | 2500      | 2320        | 180       |
| 0:00—1:00  | 3000      | 2700        | 300       |
| 1:00—2:00  | 2800      | 2520        | 280       |
| 2:00—3:00  | 3200      | 2860        | 340       |
| 3:00—4:00  | 2600      | 2220        | 380       |
| 4:00—5:00  | 2800      | 2440        | 360       |
| 5:00—6:00  | 4100      | 3700        | 400       |
| 6:00—7:00  | 4300      | 3920        | 380       |
| 7:00—8:00  | 4200      | 3856        | 344       |
| 8:00—9:00  | 3200      | 2919        | 281       |
| 9:00—10:00 | 2550      | 2370        | 180       |
| 合计         |           |             | 3425      |

蓄热电锅炉总负荷容量为200 MW, 供热区域的总面积为120万 $m^2$ , 供热区域单位面积日热负荷需求 (基准值为65 W/ $m^2$ ) 预测曲线参考文献[31], 电热转换

效率为97%, 忽略管网散热损失, 设计蓄热时长为4 h (即达到蓄满状态所需用电量为800 MWh), 蓄热电锅炉系统的全天用电量需求为1620.3 MWh。

设蓄热电锅炉企业参加受阻风电消纳交易前的用电电价438元/MWh为成本电价, 其中包括过网费约为130元/MWh。

### 4.2 算例结果及分析

首先风电场和蓄热电锅炉企业分别基于式(3) — (5)、(6) — (8) 建立相应的基于消纳受阻风电的双边收益模型。模型基本参数如表2所示, 其中,  $W_{B0}^T$  取值与时段序号 $T$ 相关, 取值为表1各时段风电受阻电量。

表2 双边收益模型基本参数

Table 2 Parameters of the bilateral benefit model

| 参数  | 取值        | 参数   | 取值  |
|---|-----------|--|-----|
| $C_{w0}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$ | 120       | $P_{LN}/\text{MW}$                             | 200 |
| $R_{w0}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$ | 308       | $\Delta T/\text{h}$                            | 1   |
| $W_{B0}^T$                                  | 表1各时段受阻电量 | $\Delta W_{L,max}/\text{MWh}$                  | 800 |
| $R_{LE}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$ | 438       | $R_L^{max}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$ | 438 |
| $R_{BN}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$ | 130       | $R_L^{min}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$ | 130 |

以交易时段23:00—0:00 (即 $T=1$ 时段) 为例进行计算, 蓄热电锅炉企业初始消纳量为20 MWh, 风电场报价为290元/MWh; 取消纳量申报上调步长 $E$ 为20 MWh, 博弈轮次 $k=150$ 时, 蓄热电锅炉企业按式(9)上报的消纳量为180 MWh, 代入式(3)、(6)求得双边收益, 达到双边博弈均衡点, 博弈结果如表3所示。

表3 时段 $T=1$ 内各轮博弈决策结果及双边收益情况

Table 3 Decision results and bilateral benefits of each round of the game in time period  $T=1$

| 博弈轮次 | 蓄热电锅炉企业申报风电消纳量 /MWh | 风电场报价 /(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1}) | 蓄热电锅炉企业收益/万元 | 风电场收益 /万元 |
|------|---------------------|---|--------------|-----------|
| 1    | 20                  | 290                                       | 0.036        | 0.34      |
| ...  | ...                 | ...                                       | ...          | ...       |
| 150  | 180                 | 211.6                                     | 1.7352       | 1.6488    |

由表3可知, 经过150轮博弈, 满足式(10)的均衡条件, 通过蓄热电锅炉企业与风电场之间的主从博

弈, 均衡状态下23:00—0:00时段内的受阻风电上网电价为211.6元/MWh, 受阻风电消纳量为180 MWh。基于此, 进一步得到各风电受阻时段的博弈决策结果, 如表4所示。其中, 由于蓄热电锅炉在5:00—6:00达到蓄满状态, 故时段6:00—10:00不再参与消纳受阻风电市场交易。表4中各时段平均交易电价为247.18元/MWh, 总计消纳电量为1266.4 MWh。将表4结果代入式(3)、(6)中得到各方最优收益增量, 如表5所示。

结合表4、表5可知, 利用本文所提出的交易决策方法, 风电场的受阻电量消纳量增加了1266.4 MWh, 收益增加了12.57万元, 蓄热电锅炉企业的收益相比之前增加了11.24万元, 说明交易双方都实现了显著的效益增量。

表4 各风电受阻时段的博弈决策结果

Table 4 Game decision results for each wind power hampered time period

| 时段         | 受阻风电交易电价<br>(元·(MWh) <sup>-1</sup> ) | 受阻风电消纳量<br>/MWh |
|------------|--------------------------------------|-----------------|
| 23:00—0:00 | 211.6                                | 180             |
| 0:00—1:00  | 204.3                                | 200             |
| 1:00—2:00  | 204.3                                | 200             |
| 2:00—3:00  | 204.3                                | 200             |
| 3:00—4:00  | 204.3                                | 200             |
| 4:00—5:00  | 204.3                                | 200             |
| 5:00—6:00  | 253.9                                | 86.4            |
| 6:00—7:00  | 308                                  | 0               |
| 7:00—8:00  | 308                                  | 0               |
| 8:00—9:00  | 308                                  | 0               |
| 9:00—10:00 | 308                                  | 0               |

表5 博弈决策后各方最优收益

Table 5 Optimal gain for each party after game decisions

| 博弈决策者   | 收益增量/万元 |
|---------|---------|
| 风电场     | 12.57   |
| 蓄热电锅炉企业 | 11.24   |

## 5 结论

本文提出了一种蓄热锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法, 蓄热电锅炉企业参与消纳受阻风电, 荷源双方在经济收益上可实现双赢, 以激励蓄热电锅炉企业进一步挖掘可调节潜力, 增加对风

电的消纳能力。本文主要结论如下。

1) 在风电大发时段, 利用蓄热电锅炉的可调节特性参与调度可有效缓解系统的调峰压力, 从而消纳受阻风电。

2) 基于蓄热电锅炉负荷参与消纳风电的荷源双边收益以及主从博弈关系, 采用蓄热锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法可以在减少受阻风电的同时, 增加蓄热电锅炉企业的收益。

3) 以某新能源送端电网风电与蓄热电锅炉实际数据进行仿真计算, 验证了所提决策方法可提升风电消纳能力, 增加风电企业和蓄热电锅炉企业的经济收益, 实现系统和发用电企业多赢目标。

本文所提出的蓄热电锅炉负荷参与消纳受阻风电的主从博弈交易决策方法, 能够兼容风电场和蓄热电锅炉企业双边利益最大化诉求, 实现交易双方的互利共赢, 充分调动蓄热电锅炉企业参与消纳风电的积极性, 对于提高大规模新能源利用水平具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9. ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9(in Chinese).
- [2] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158. ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158(in Chinese).
- [3] 崔杨, 庄妍, 陈志, 等. 基于蓄热式电锅炉电-热时移特性的弃风消纳方案经济性分析[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 9-17. CUI Yang, ZHUANG Yan, CHEN Zhi, et al. Economic analysis of abandoned wind power consumption schemes based on electric-thermal time shift characteristics of regenerative electric boiler[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 9-17(in Chinese).
- [4] 严干贵, 杨玉龙. 电力辅助服务市场下电采暖促进风电消纳的经济性分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 309-316. YAN Gangui, YANG Yulong. Economic analysis of electric heating for wind power consumption under the background of ancillary service market[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 309-316(in Chinese).
- [5] 雷映, 刘明真, 林开敏. 基于协调负荷调度模型的蓄热采暖解耦方法[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 55-62. LEI Yi, LIU Mingzhen, LIN Kaimin. Heat storage decoupling

- method based on coordinated load scheduling model[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 55-62(in Chinese).
- [6] 王振浩, 杨璐, 田春光, 等. 考虑风电消纳的风电-电储能-蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊1): 137-143.  
WANG Zhenhao, YANG Lu, TIAN Chunguang, et al. Energy optimization for combined system of wind-electric energy storage-regenerative electric boiler considering wind consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 137-143(in Chinese).
- [7] 朱浩昊, 朱继忠, 李盛林, 等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(4): 383-397.  
ZHU Haohao, ZHU Jizhong, LI Shenglin, et al. Review of optimal scheduling of integrated electricity and heat systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 383-397(in Chinese).
- [8] 李英俊, 张耀, 许志军, 等. 基于数据驱动的电-热综合能源系统两阶段鲁棒备用优化[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(2): 127-137.  
LI Yingjun, ZHANG Yao, XU Zhijun, et al. Data-driven based two-stage robust reserve optimization of integrated electric-heat systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 127-137(in Chinese).
- [9] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 考虑采暖建筑用户热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同的电热联合系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 124-135.  
ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering the coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 124-135(in Chinese).
- [10] CHEN Q F, XIA M C, WANG S, et al. Optimization modeling method for coal-to-electricity heating load considering differential decisions[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 188-196.
- [11] 张嘉睿, 陈晚晴, 张雅青, 等. 考虑配网功率约束及可靠供暖的园区蓄热式电采暖双层优化配置方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 142-152.  
ZHANG Jiarui, CHEN Wanqing, ZHANG Yaqing, et al. Bi-level optimal planning method for park regenerative electric heating considering capacity of distribution network and reliable heating[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 142-152(in Chinese).
- [12] 张宏业, 吴杰康, 蔡锦健, 等. 考虑空调负荷和柔性热负荷响应的综合能源系统储能鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2733-2744.  
ZHANG Hongye, WU Jiekang, CAI Jinjian, et al. Robust optimal allocation of energy storage in integrated energy system considering demand response of air conditioning load and flexible heating load[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2733-2744(in Chinese).
- [13] 陈灵敏, 吴杰康, 唐惠玲, 等. 考虑可再生能源消纳的CCHP微能源网优化配置模型[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 121-129.  
CHEN Lingmin, WU Jiekang, TANG Huiling, et al. Optimal allocation model of the micro-energy grid with CCHP considering renewable energy consumption[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 121-129(in Chinese).
- [14] 熊宇峰, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 31-38.  
XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 31-38(in Chinese).
- [15] 李娇. 末端热用户负荷预测及其灵活性量化研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [16] 李明柱, 陈灏馨. 基于ARX模型的建筑供热负荷预测问题研究[J]. 上海节能, 2022(5): 554-560.  
LI Mingzhu, CHEN Haoxin. Research on building heating load prediction based on ARX model[J]. Shanghai Energy Conservation, 2022(5): 554-560(in Chinese).
- [17] 孙勇, 严干贵, 郑太一, 等. 电力市场背景下蓄热式电采暖消纳弃风的经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(4): 532-538.  
SUN Yong, YAN Gangui, ZHENG Taiyi, et al. Economic analysis of electrical heating with heat storage using grid integrated wind power[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(4): 532-538(in Chinese).
- [18] 罗桓桓, 程中林, 孙婧卓, 等. 储热参与调峰辅助集中交易市场模式及优化认购模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 187-193.  
LUO Huanhuan, CHENG Zhonglin, SUN Jingzhuo, et al. Market mode and optimal subscription model of peak regulation auxiliary centralized trading with heat storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 187-193(in Chinese).
- [19] 张小东, 杨廷天, 任景, 等. 考虑新能源消纳的大用户直购电机制及其在西北电网的应用[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 138-143.  
ZHANG Xiaodong, YANG Tingtian, REN Jing, et al. Large consumer direct-purchasing mechanism and its application in northwest power grid considering renewable energy consumption[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 138-143(in Chinese).
- [20] 孙婧卓, 江全元, 程中林, 等. 大规模电储热参与调峰辅助双边交易容量及价格区间优化模型[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 1995-2001.  
SUN Jingzhuo, JIANG Quanyuan, CHENG Zhonglin, et al. Capacity and price range optimization model for large-scale electric heat storage participating in auxiliary peaking service in bilateral transactions[J]. Power System Technology, 2019,

- 43(6): 1995-2001(in Chinese).
- [21] 韩小齐, 刘文颖, 申自裕, 等. “三北”地区热负荷参与风电消纳的日前市场交易机制[J/OL]. 电力自动化设备, 2022: 1-16[2022-08-28]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202207024>.
- HAN Xiaoqi, LIU Wenyong, SHEN Ziyu, et al. Day-ahead market trading mechanism for heat load participating in wind power consumption in “Three Norths” Regions[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2022: 1-16[2022-08-28]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202207024>. (in Chinese)
- [22] 陈璐, 徐青山, 杨永标, 等. 考虑低碳优先的社区群电热交易策略[J/OL]. 电网技术, 2022: 1-17[2022-08-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0276>.
- CHEN Lu, XU Qingshan, YANG Yongbiao, et al. Heat-electricity trading decision of community group considering low-carbon priority[J/OL]. Power System Technology, 2022: 1-17[2022-08-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0276>. (in Chinese)
- [23] 孙欣, 张誉匀, 谢敬东, 等. 基于“空间报价”的电-热现货市场联合出清模式设计[J/OL]. 电网技术, 2022: 1-13[2022-08-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0453>.
- SUN Xin, ZHANG Yuyun, XIE Jingdong, et al. Holistic clearing modes design in power-heat spot energy market based on ‘space quotes’ [J/OL]. Power System Technology, 2022: 1-13[2022-08-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0453>. (in Chinese)
- [24] 罗桓桓. 电储热参与电力调峰交易机制与动态电价模型研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [25] 陈刚, 那广宇, 王琛淇, 等. 考虑综合需求响应和储能的双阶段虚拟电厂交易策略[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 64-71.
- CHEN Gang, NA Guangyu, WANG Chenqi, et al. Two-stage virtual power plant trading strategy considering comprehensive demand response and energy storage[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(1): 64-71(in Chinese).
- [26] 黄宇, 吴思橙, 徐璟, 等. 不完全信息下计及环境成本的多能源集线器博弈优化调度[J/OL]. 电力系统自动化, 2022: 1-14[2022-08-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220608.2320.010.html>.
- HUANG Yu, WU Sicheng, XU Jing, et al. Game optimal scheduling among multiple energy hubs considering environmental cost with incomplete information[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2022: 1-14[2022-08-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220608.2320.010.html>. (in Chinese)
- [27] 缴傲, 胡臻, 向萌, 等. 考虑综合需求响应的社区综合能源系统主从博弈策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 94-102.
- JIAO Ao, HU Zhen, XIANG Meng, et al. Master-slave game strategy for community integrated energy system considering integrated demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2021, 33(9): 94-102(in Chinese).
- [28] 王瑞, 程杉, 刘焯, 等. 基于综合需求响应和奖惩阶梯碳交易的能源枢纽主从博弈优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 75-85.
- WANG Rui, CHENG Shan, LIU Ye, et al. Master-slave game optimal scheduling of energy hub based on integrated demand response and a reward and punishment ladder carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 75-85(in Chinese).
- [29] 李咸善, 马凯琳, 程杉. 含多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 8-22.
- LI Xianshan, MA Kailin, CHENG Shan. Dispatching strategy of an active distribution network with multiple regional integrated energy systems based on two-level game optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 8-22(in Chinese).
- [30] 于均峰. 考虑热发电电权交易的风电场多能源储能优化配置研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [31] 李潇, 刘文颖, 朱丽萍, 等. 蓄热电锅炉参与受阻风电消纳的源荷优化控制方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 31-39.
- LI Xiao, LIU Wenyong, ZHU Liping, et al. Source-load optimization control method for thermal storage boiler participating in blocked wind power consumption[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(4): 31-39(in Chinese).

收稿日期: 2022-04-10; 修回日期: 2022-08-29。

#### 作者简介:



王敏骁

王敏骁(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电与并网技术、电力电子技术, E-mail: minxiao.wang@fau.de。

李潇(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统分析、运行及控制, E-mail: m18813024710@163.com。

韩小齐(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统分析、运行及控制, E-mail: hxq18810790027@163.com。

王维洲(1967), 男, 硕士, 研究方向为新能源发电与并网技术, E-mail: wangweizhou945@sina.com。

刘文颖(1955), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统分析、运行及控制, E-mail: liuwenyings@sina.com。

(责任编辑 李锡)